第 37 卷第 19 期 生 态 学 报 Vol.37,No.19
2017 年 10 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Oct.,2017

DOI: 10.5846/stxb201607081406
于海洋,张飞,曹雷,王娟,杨胜天.基于乡镇尺度的土地生态安全时空格局评价研究——以博尔塔拉蒙古自治州为例.生态学报,2017,37(19):6355-6369.
Yu H Y, Zhang F, Cao L, Wang J, Yang S T.Spatial-temporal pattern of land ecological security at a township scale in the bortala mongolian autonomous prefecture.Acta Ecologica Sinica,2017,37(19):6355-6369.

基于乡镇尺度的土地生态安全时空格局评价研究
——以博尔塔拉蒙古自治州为例

于海洋[1,2],张 飞[1,2,3,*],曹 雷[1,2],王 娟[1,2],杨胜天[1,4]
1 新疆大学资源与环境科学学院,乌鲁木齐 830046
2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室,乌鲁木齐 830046
3 新疆智慧城市与环境建模普通高校重点实验室,乌鲁木齐 830046
4 北京师范大学地理学与遥感科学学院,北京 100875

摘要:近年来,国内外学者已做了大量区域土地生态安全评价的研究,但大多针对流域或县级以上行政单元,乡镇尺度的土地生态安全评价研究甚少。因此,选择地处我国西北干旱生态脆弱区的博尔塔拉蒙古自治州为研究区,以“3S”技术和数学统计方法为支撑,结合研究区自然地理特征和社会经济状况,构建博尔塔拉蒙古自治州乡镇级压力-状态-响应(Pressure-State-Responses, P-S-R)土地生态安全评价模型,并对其土地生态安全空间格局特征及成因进行诊断性分析。结果表明:(1) 2014 年博州土地生态安全较 2011 年有所恶化,Ⅲ级向Ⅳ级转化的面积最大,高达 2555.33 km^2,主要在温泉县境内,其次是Ⅴ级区域向Ⅳ级转化 1356.53 km^2,主要发生在精河县的茫丁乡和托托乡;(2)博州大部分乡镇的土地生态安全状况处于Ⅲ级水平,区域生态结构不稳定,亟待调整;(3) 博州土地生态安全状况具有明显地域性分布的特征,低值区多集中于博州东部荒漠地区,高值区多集中在博州中部绿洲区域和湖区。研究结果可为乡镇级土地生态安全评价提供参考,为区域生态保护协调推进与乡镇可持续发展提供理论指导。

关键词:乡镇尺度;土地生态安全;P-S-R 模型;博尔塔拉蒙古自治州

Spatial-temporal pattern of land ecological security at a township scale in the bortala mongolian autonomous prefecture

YU Haiyang[1,2], ZHANG Fei[1,2,3,*], CAO Lei[1,2], WANG Juan[1,2], YANG Shengtian[1,4]
1 *College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*
2 *Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi* 830046, *China*
3 *Key Laboratory of Xinjiang Wisdom City and Environment Modeling, Urumqi* 830046, *China*
4 *College of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*

Abstract: Regional land ecosystem is facing deterioration from the rapid growth of urbanization. In order to promote sustainable development of the land ecosystem, it is necessary that we evaluate regional land ecological security. Many researchers have studied and evaluated for regional land ecological security; however, most of the evaluation was based on watershed and county scale, and few researches focused on the township scale. In this study, Bortala Mongolian Autonomous Prefecture (i.e. Bortala) in Xinjiang Uygur Automous region was taken as study area, and Remote Sensing (RS), Geographical Information System (GIS), and Global Position System (GPS) technologies were adopted to analyze temporal

基金项目:新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程项目(2013731002);国家自然科学基金项目(41361045,41130531);新疆绿洲生态(教育部省部共建)重点实验室开放课题(XJDX0201-2012-01)
收稿日期:2016-07-08; **网络出版日期**:2017-05-27

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangfei3s@163.com

and spatial perspectives of land ecological security in Bortala. On the basis of the natural geographic features and socio-economic situation of Bortala, we constructed the pressure-state-response (P-S-R) land ecological security evaluation model (township scale) in Bortala. Based on the two period's data of statistic yearbook and remote sensing in 2011 and 2014, we first constructed the index system, using 25 indices reflecting regional P-S-R. The entropy weight and analytic hierarchy process methods were used to determine the indices weight of Bortala P-S-R model. Finally, the land ecological security index of Bortala was calculated with the data obtained from the P-S-R model by GIS Grid. The results show that: (1) The land ecological security index had deteriorated from 2011 to 2014 in Bortala. Between 2011 and 2014, 2555.33 km^2 of level III (grade of security) transferred to level IV, which deteriorated areas mainly concentrated in Wenquan County; 1356.53 km^2 of level V transferred to level IV, which improved areas concentrated in the Mangding town and Tuotuo town of Jinghe County. (2) The land ecological security index of most towns was at level III in Bortala, which respected the ecological structure of these towns were not stable. (3) The spatial difference of land ecological security index was obvious in Bortala, the worst places were located in the eastern desert, and the best places were concentrated in the central oasis and lake. The evaluation results and major environment problems may help the local government finding inappropriate and inadequate for Bortala development. Bortala Prefecture is a drought-prone and ecologically vulnerable region in the Northwest region. Temporary land use regulation cannot guarantee long-term regional ecological balance and security. In this study, we recommend increased attention on regional ecological protection and sustainable development for villages and towns.

Key Words: township scale; land ecological security; P-S-R model; Bortala Mongolian Autonomous Prefecture

自 20 世纪 90 年代起,国家实施西部大开发战略,西部干旱区作为中国 21 世纪开发建设的重点区域,然而西部干旱区也是我国人地关系最为紧张、矛盾最为尖锐的区域,严酷的自然环境决定了其生态系统十分敏感,而脆弱的生态环境及突出的生态问题已成为制约西部地区经济发展的瓶颈[1]。随着人口持续增长、城镇化和工业化的快速发展,人类对土地的需求大幅增加[2],土地生态系统面临人类日益严重的威胁[3]。自 IIASA (International Institute for Application System Analysis, 国际应用系统分析研究所)于 1989 年提出生态安全的概念以来[4],衍生出定量描述区域土地系统安全状况的相关概念。其中,土地生态安全是指在一定时空范围内,土地系统能够保持其结构与功能不受威胁或少受威胁的健康状态,并能够为社会经济可持续发展提供其服务,从而维持复合生态系统的长期协调发展的能力[5]。土地生态安全研究既是当前多学科交叉研究领域,也是维护全球安全、人类自身安全和国家生态安全的重大需求目标[6]。

生态安全研究是土地生态安全研究的基础[7-8],国外生态安全研究侧重从不同角度关注和探讨生态安全问题,主要集中在基因工程生物的生态风险与安全、生态入侵风险、食品安全、水资源安全、生态系统健康等方面[9-11]。国内的研究主要涉及研究方法、指标体系、安全阈值的确定等方面[12-13],研究区域主要集中在生态环境较为典型和脆弱的区域,重点突出人类活动对脆弱生态环境的干扰[14]。生态安全评价研究的方法较多,主要有综合指数法[15]、物元模型法[16-17]、生态足迹法[18]、景观生态学方法[8,19]和生态系统服务价值[20]等。其中,王宏卫等[21]基于乡镇尺度,对克里雅河绿洲生态承载力进行了评价分析;蒙吉军等[22]利用 GIS 手段研究了鄂尔多斯市的土地生态安全变化情况,明确了空间主成分分析对土地生态安全评价的重要性;张飞等[23]基于景观格局研究了景观格局变化对生态安全的影响,利用生态弹性度,反映了流域生态安全的变化情况;于潇等[24]采用综合指数法,引入景观格局安全指数和生态质量指数,论证了农业开发对景观生态系统的负面影响;王耕等[25]利用空间统计学方法,发现生态安全指数在空间上存在较强的正相关关系。所用评价体系大多采用"压力-状态-响应"(P-S-R)机理框架,其结论往往是以行政区为评价单元的总体评价,难以体现生态安全空间差异;而以景观生态学方法对土地生态安全进行研究,大多缺少社会经济数据的支撑,仅能从空间格局上评价其变化方向,难以说明其原因[26-27]。而随着科技发展,已进入"互联网+"时代,多渠道信息传递、获取愈发方便,高级别行政区域(省、市、县)在网信息量大、数据丰富,但乡镇作为我国第四级行政单元,在网信息量

较少、数据匮乏,因此,现有土地生态安全评价的相关研究多集中在省、市、县级别,乡镇土地生态安全评价相对较少。

2012 年底,我国通过“十八大”开始大力推进“生态文明”建设,为了探讨“生态文明”建设下区域土地生态安全变化状况,本文选择博尔塔拉蒙古自治州(以下简称博州)为研究区,确定 2011 年、2014 年为研究年度,运用 GIS、RS 技术手段,结合研究区自然地理特征和社会经济状况,构建博州乡镇级 P-S-R 土地生态安全评价模型,运用熵权法和层次分析法组合赋权法求得指标权重[28-29],计算博州各乡镇土地生态安全指数,并对其土地生态安全空间格局特征及成因进行诊断性分析。为合理改善博州社会经济快速发展与生态环境退化间的矛盾提供科学依据,使博州土地生态安全的时空格局研究具有实用性,有利于指导人们因地制宜地进行干旱区开发与管理,对完善西北干旱区适用的土地生态安全评价指标体系具有一定的实践意义。

1　研究区概况

博州位于中国新疆维吾尔自治区西北边陲,全州总面积 24896 km^2,边界长达 380 km,有“中国西部第一门户之称”[30]。博州西、南、北三面环山,中间是“海棠叶状 ”的倾斜河谷,自西向东呈降低趋势。地貌景观由中部博尔塔拉河和东部精河、大河沿子河两岸孕育的“人工绿洲”、南北两侧的山麓、艾比湖环湖四周的荒漠戈壁组成(图 1)。博州属典型的北温带大陆性干旱气候,但其西部与北部山麓夏半年降水充沛,水系也较丰富,维系着山前地带“人工绿洲”的生命。博州辖博乐市、阿拉山口市、精河县和温泉县。其中,精河县包括:精河镇、大河沿子镇、茫丁乡、托里乡、托托乡;温泉县包括:博格达尔镇、哈日布呼镇、安格里格乡、查干屯格乡、扎勒木特乡、塔秀乡;博乐市包括:青得里街道、顾力木图街道、克尔根卓街道、三台街道、小营盘镇、达勒特镇、乌图布拉格镇、青得里乡、贝林哈日莫墩乡,因博乐市的青得里街道、顾力木图街道、克尔根卓街道、三台街道构成博乐市市区,本文将四者合并称作城区街道。阿拉山口市系口岸城市,政策因素干扰过强,在本研究中不予分析。

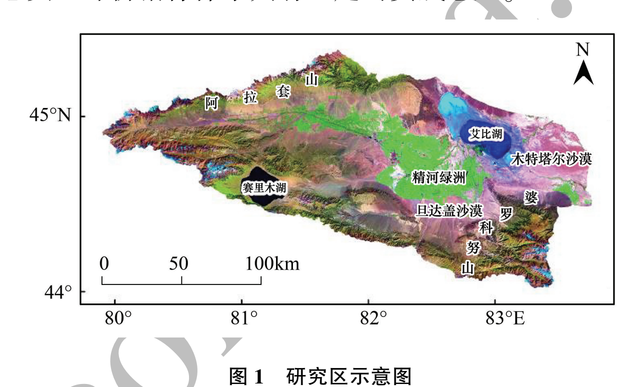


图 1　研究区示意图

Fig.1　The sketch map of study area

2　数据资料与研究方法

2.1　数据来源与处理

2.1.1　数据来源

本研究用到的数字影像数据有:Landsat5 TM、Landsat8 OLI 数据,空间分辨率 30 m×30m;ASTER GDEM 数据,空间分辨率 30 m×30 m;MODIS 归一化植被指数 (NDVI)月合成产品,空间分辨率 500 m×500 m;博州土壤质地图,博州 1:5 万地形图,博州 1:5 万土地利用专题图,博州乡镇边界。野外考察数据有 GPS 数据和景观照片;社会经济等数据来源于 2011—2015 年《博尔塔拉蒙古自治州统计年鉴》、《博乐市统计年鉴》、《精河县统计年鉴》、《温泉县统计年鉴》以及相关职能部门的统计数据;另外,本研究为建立评价标准,选择了多项类比标准参考数据。研究区主要数据类型及来源如表 1 所示。

2.1.2　数字影像数据预处理

(1)遥感影像预处理及分类　所用博州 2011 年和 2014 年 10 月 Landsat 影像,图像质量好,植被茂密,无云、雾和积雪等影响。首先利用 FLAASH 模型对所用影像数据进行辐射校正[31],再对影像进行几何精校正,即以研究区 1:5 万地形图为基础,采用控制点-多项式拟合校正法,选择高斯-克吕格投影模式及三次卷积内插法重采样进行图像点的精密校正(选择的地面控制点的误差均小于 0.5 个像元)。结合野外考察工作中的 GPS 定点信息和样点景观照片,以 Google 地球为辅助工具,基于软件 ENVI 4.8 目视解译选取“感兴趣区”,利

用 CART 算法[32]对“感兴趣区”样本进行分析,生成决策树分类规则,通过决策树规则进行遥感影像分类监督分类,分别是耕地、林草地、水体、盐渍地和其他(建设用地、沙漠、戈壁、山体)。最后,进行人工目视解译的修正。在 2011 年、2014 年分别选用 130 和 150 个 GPS 实证点进行验证,经计算,博州土地利用/覆被(Land Use/Land Cover, LULC)分类的精度分别为 76.12%、74.83%,Kappa Coefficients 为 0.7489、0.7324,已达到 Landsat 影像分类的较高标准,而计算机分类精度分别为 96.07%、94.05%,Kappa Coefficients 为 0.9507、0.9302,其精度大于 85%,满足使用要求。

表 1 数据类型及来源

Table 1 Data types and sources

数据类型 Data types	数据详细信息 Data information	数据来源 Data sources
数字影像数据 Image data	2011 年 10 月 Landsat5 TM、2014 年 10 月 Landsat8 OLI 数据(轨道号:146/29,147/29,147/28,148/29;空间分辨率 30 m×30m)	美国地质勘探局(http://glovis.usgs.gov/)
	ASTER GDEM 数据(2009 年,空间分辨率 30m×30m),MODIS NDVI 月合成产品(2011 年、2014 年 5—10 月,空间分辨率 500 m×500m)	中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(http://www.gscloud.cn/)
	博州乡镇边界,博州土壤质地图,博州 1:5 万地形图,博州 1:5 万土地利用专题图	博州国土局、精河县国土局
野外考察数据 Field data	GPS 数据,景观照片	2011 年 10 月、2014 年 10 月野外考察
社会经济数据 Society and economic data	博州、博乐市、精河县、温泉县:2011 年—2015 年统计年鉴	博州统计局、博乐市统计局、精河县统计局、温泉县统计局
类比标准参考数据 Standard data	《国家级生态县、生态市、生态省建设指标(试行)》	国家环境保护总局

(2)依托 GIS 平台,处理、获取空间数据,主要包括:1)由 DEM 数据生成坡度图、水系图;2)从水系图和道路数据中提取各乡镇的水网密度和路网密度;3)基于博州 LULC 数据,利用软件 Fragstats 3.3 计算各乡镇的区域香农多样性指数和景观破碎度;4)由博州土地利用专题图,获取各乡镇的森林覆盖率和耕地面积比重;5)基于博州当年 5—10 月 MODIS NDVI 月合成产品,得出该年的年均 NDVI,NDVI 取值范围[0,1]。

2.1.3 评价指标标准化处理

本文的评价指标既有正向指标又有逆向指标,因此在进行指标的处理上有所区分。本文采用极差归一化法进行指标的标准化,其公式为:

$$Y_{ij} = (1 - a) + a\frac{X_{ij} - X_{\min j}}{|X_{\max j} - X_{\min j}|} \tag{1}$$

$$Y_{ij} = (1 - a) + a\frac{X_{\max j} - X_{ij}}{|X_{\max j} - X_{\min j}|} \tag{2}$$

式中,Y_{ij}为标准化后的值,X_{ij}为第 i 年第 j 项指标原始值,$X_{\max j}$和 $X_{\min j}$分别为相应指标的最大值和最小值,a 取 0.9。当指标有国家标准时,$X_{\max j}$和 $X_{\min j}$分别为相应指标的安全值和不安全值。

2.2 土地生态安全评价

2.2.1 评价单元

目前已开展的土地生态安全评价研究多以行政单元(省、市、县)为数据载体,数据资料获取较为方便,但结合新疆县级行政单元幅员辽阔的特点,以县级区域为评价单元欠缺空间的可视化表达,宏观指导性有余,缺乏实践指导性。为便于博州土地生态安全评价,本文采用 GIS 空间叠加的方法,结合统计资料与遥感数据特点,确定乡镇作为最小评价单元,并将多源数据重采样至 30 m×30 m,可通过较细的粒度的栅格数据反映评价单元内的土地生态安全的空间差异。

2.2.2　P-S-R 指标体系与权重

P-S-R 框架模型由联合国经济合作开发署建立[33]。其中,压力指标反映人类社会、经济活动给区域环境、资源利用和生态系统造成的负担[34];状态指标表述当前自然资源、环境质量与生态系统的状态[35-36];响应指标是人类社会在其发展过程中,人类为生态系统可持续发展,所采取的优化措施与对策及已获得的良好反馈[37]。P-S-R 模型从人类与环境系统的相互作用与影响出发,对环境指标进行组织分类,具有较强的系统性[38]。

本研究在参考有关研究成果的基础上,结合博州实际情况,按照指标选取的科学性、全面性、实用性和动态性等原则,结合数据的可得性,以博州土地生态安全综合评价为评价总目标,充分考虑区域土地生态安全各评价因子的复杂关系,借鉴国内相关研究成果[22,39-42],依据 P-S-R 框架,自上而下、逐层分解为 4 个层次:目标层、准则层、要素层和指标层[28-30]。重点选取与土地生态安全密切相关:荒漠化率、人口密度、NDVI、LULC 等 30 个属性特征构建评价指标体系,再利用 SPSS 软件 30 项指标做 Pearson 相关性分析进行筛选,优化同准则层内相关性大于 0.8 或目标层相关性大于 0.9 的指标,最终确定由 25 项指标构成博州土地生态安全评价指标体系(表 2)。考虑到单一的赋权方法的局限性,利用层次分析法和熵权法组合赋权法,可体现土地生态安全评价的区域性,又可体现数据本身的数理特征。

表 2　博州 P-S-R 评价指标体系标准及权重

Table 2　Standards and weights of indications based on P-S-R assessment in Bortala

目标层 Object layer	准则层 Criteria layer	要素层 Factor layer	指标层 Index layer	指标来源 Index sources	指标权重 Index weights	标准值 Standard value 安全值 Safety value	标准值 Standard value 不安全值 Not safety	标准来源 Standard source
博州土地生态安全 Land ecological security of Bortala	压力	环境压力	单位耕地的化肥使用量(kg/hm^2)	统计年鉴	0.031	10.00	250.00	国家标准
			单位耕地的农药使用量/(kg/hm^2)	统计年鉴	0.030	0.00	10.00	国家标准
			单位耕地的地膜使用量/(kg/hm^2)	统计年鉴	0.030	—	—	极差标准化
			草原载畜量/(羊单位/ hm^2)	统计年鉴	0.041	—	—	极差标准化
		社会压力	人口密度/(人/hm^2)	统计年鉴	0.040	—	—	极差标准化
			自然增长率/%	统计年鉴	0.045	2.00	8.00	国家标准
			经济密度/(万元/km^2)	统计年鉴	0.037	—	—	极差标准化
		资源压力	人均粮食产量/(kg/人)	统计年鉴	0.045	400.00	100.00	国家标准
			人均耕地面积/(hm^2/人)	统计年鉴	0.039	0.08	0.02	国际标准
	状态	地形条件	坡度/(°)	DEM 数据	0.047	—	—	评分后赋值
		植被条件	NDVI	产品数据	0.066	—	—	极差标准化
			森林覆盖率/%	专题数据	0.033	—	—	极差标准化
		水文条件	水网密度/(km/km^2)	DEM 数据	0.032	—	—	极差标准化
		土壤条件	土壤质地	专题数据	0.060	—	—	评分后赋值
		景观条件	香农多样性指数	遥感数据	0.039	—	—	极差标准化
			景观破碎度/(个/hm^2)	遥感数据	0.032	—	—	极差标准化
	响应	自然响应	荒漠化率/%	专题数据	0.044	—	—	极差标准化
		人文响应	耕地面积比重/%	专题数据	0.030	—	—	极差标准化
			耕地的灌溉比率/%	统计年鉴	0.030	50.00	10.00	国家标准
			土地利用类型	遥感数据	0.060	—	—	评分后赋值
			路网密度/(km/km^2)	专题数据	0.040	—	—	极差标准化
			人均 GDP/(万元)	统计年鉴	0.044	2.50	0.50	国家标准
			单位面积的机械化水平/(W/hm^2)	统计年鉴	0.038	—	—	极差标准化
		社会响应	第三产业比重/%	统计年鉴	0.034	45.00	5.00	国家标准
			城市化水平/%	统计年鉴	0.033	50.00	5.00	国家标准

—无标准数据

2.2.3 指标定义与标准化

由于评价指标类型繁多,单位各异,很难对它们的实测值进行直接对比,在指标评价方面优先选取国际或国家标准,其次是地方"十二五"规划的生态文明标准,先确定评价指标标准值,再根据公式(1)、(2),对评价指标标准化。对于那些无明确评价标准值的指标,则按照极差标准化,依据公式(1)、(2),正指标用公式(1)标准化,逆指标用公式(2)标准化,对评价指标赋予标准化分值,分值在0—1之间。而在影像数据中,有的指标可用极差标准化进行划分,如NDVI,水网密度等,而有的指标则需要进行量化分级赋值,例如坡度、土壤质地和土地利用类型。部分指标含义及计算方法如下:

单位耕地的化肥使用量　即乡镇当年的化肥施用量/区域耕地总面积,该指标为逆指标,其值越大,农业生产对土地生态系统产生的压力越大,土地生态安全越低。

单位耕地的农药使用量　即乡镇当年的农药施用量/区域耕地总面积,该指标为逆指标,单位耕地农药施用量越多,土地生态系统受到的农药污染越严重,土地生态安全越低。

单位耕地的地膜使用量　即乡镇当年的地膜使用量/区域耕地总面积,该指标为逆指标,单位耕地地膜使用量越多,土地生态系统受到的塑料污染越严重,土地生态安全越低。

草原载畜量　即单位土地面积上的牲畜数,计算公式为:草原载畜量=牲畜总数/土地总面积,表征单位草地面积上的牲畜承载压力,该指标为逆指标,其值越大,单位草地面临的环境压力越大,其中,1匹马=2羊单位,1头牛=5羊单位。

人口密度　即单位土地面积上的人口数,计算公式为:人口密度=人口总数/土地总面积,表征单位土地面积上的人口承载压力,该指标为逆指标,其值越大,单位土地面临的人口压力越大。

自然增长率　即一年内人口自然增加数与当内平均人口数之比。表征人口自然增长对土地生态系统产生的压力,该指标为逆指标,其值越大,说明人口自然增长越快,对土地生态系统造成的压力越大。

经济密度　即乡镇GDP/土地总面积,表征乡镇经济发达程度,该指标为正指标,其值越高,单位土地的利用效率也越高,土地利用越集约,越有利于土地生态安全的维护。

人均粮食产量　即粮食总产量/人口总数,表征乡镇耕地承载人口的能力,该指标为正指标,其值越大,说明耕地产出水平越高,粮食安全越有保障,其他土地生态压力越小。

人均耕地面积　即耕地面积量/人口数,表征耕地资源状况,该指标为正指标,其指标值越大,区域粮食安全保障的压力越小。

坡度　即高度差/水平距离,利用ArcGIS从ASTER GDEM数据中提取,该指标为逆指标,坡度越大,人类开发利用土地的难度越大,不利于人类对土地生态系统的维护。根据坡度对各社会分工的影响,可视0—5°为安全标准值,赋值为1,5°—10°、10°—15°、15°—25°、>25°分别赋值为0.8、0.6、0.4、0.2。

NDVI　从MODIS产品数据中获取,利用软件ArcGIS 9.3求得2011年和2014年的年均NDVI(5—10月),NDVI取值范围[0,1]。该指标为正指标,其值越大,区域植被长势越好,有利于稳定土地生态系统。因考虑到大面积地表水体对干旱区生态环境的重要性,将湖区(艾比湖和赛里木湖)图层导入ArcGIS,并通过算法将湖区范围的NDVI赋值为1。

森林覆盖率　即乡镇森林面积与土地总面积的百分比,是表征水土保持状况的重要指标,该指标为正指标,其值越大,区域土地生态环境越好。

水网密度　即乡镇境内河流长度/土地总面积,该指标为正指标,其值越大,区域水资源越丰富,越有利于区域土地生态系统的有效运行。

土壤质地　从博州土壤质地专题数据中获取,根据其土壤质地在自然界中的稳定性及维系土地生态系统稳定性的重要程度划分,考虑到没有哪一类是完全安全的或完全不安全,故最高的量化值为0.9,最低的量化值为0.1,基岩、湖泊、冰川雪被赋值为0.9,壤质、砾质、黏质、沙质分别赋值为0.7、0.5、0.3、0.1。

Shannon多样性指数　$SHDI = -\sum_{i=1}^{m}(P_i \cdot \ln P_i)$,式中$P_i$是乡镇内某一景观类型的周长,$m$是乡镇内景观

类型数量,在本文中,$m=5$,该指标为正指标,其值越大,区域景观类型越丰富,区域景观结构的稳定性越强,土地生态系统也越稳定。

景观破碎度　区域景观斑块数/土地总面积,该指标为逆指标,其值越大,区域景观破碎化程度越高,土地生态系统越不稳定。

荒漠化率　区域(前一时期荒漠化面积-后一时期荒漠化面积)/时间间隔,该指标为逆指标,其值越大,区域荒漠化速率越快,表明该区域的土地生态系统出现缺陷,土地生态安全程度低。

耕地面积比重　即乡镇耕地面积与土地总面积的百分比,该指标为逆指标,其值越大,区域经济发展越依赖农业经济,不利于区域土地生态结构的合理发展。

耕地的灌溉比率　即耕地有效灌溉面积/耕地面积,可表征区域水土资源的协调发展状况,该指标为正指标,其值越大,水土协调发展的状况越好,耕地资源抗旱能力越强,土地生态系统越安全。

土地利用类型　利用 ENVI 中的监督分类方法从 Landsat 数据中获取,根据其在自然界中的稳定性及维系土地生态系统稳定性的重要程度划分,水体、林草地、耕地、盐渍地分别赋值为 0.9、0.7、0.5、0.3,其他(建设用地、戈壁、荒漠等)赋值为 0.1。

路网密度　即乡镇境内道路总里程/土地总面积,该指标为正指标,其值越大,区域内部级同邻域间的交互性越强,有利于土地生态安全维护。

人均 GDP　即 GDP/人口数,该指标为正指标,其值越大,乡镇社会经济发展水平越高,维护土地生态安全的能力也就越强。

单位面积的机械化水平　即农业机械总动力/耕地面积,可表征土地生态安全的科技水平,该指标为正指标,其值越大,耕地利用的科技水平和效益越高,有利于土地生态系统的健康运行。

第三产业比重　即第三产业产值/GDP,第三产业自然资源消耗少、环境污染较轻,该指标为正指标,其值越高,区域产业水平也越高,对土地生态系统的压力也越小。

城市化水平　即城镇人口/总人口,表征乡镇城市建设用地的集约化水平,该指标为正指标,其值越大,区域城镇人口越多,城镇建设用地越集约,对外界资源的吸引力越大。

2.2.4　土地生态安全模型

土地生态安全指数(Land Ecological Security, LES)是衡量一个区域土地生态安全程度的模型,它能够根据各评价指标数据,判断出区域土地生态安全状况,值在 0—1 之间。LES 计算模型为:

$$\mathrm{LES} = \sum_{i=1}^{n} P_i \times w_i \tag{3}$$

式中,LES 为某个乡镇的土地生态安全指数,P_i 为第 i 个指标标准化后的值,w_i 是第 i 个指标的权重。

2.2.5　评判标准

评判标准划分在以往的研究中,常将土地生态安全程度由低到高依次划分为不安全、较不安全、临界安全、较安全、安全 5 个评价等级,即在绝对意义下对应的安全综合指数分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1。分级标准过于绝对,导致分类结果与实际偏差过大。本文首先分析研究区生态系统状况并参照相关文献[22,28,38],确定博州土地生态安全指数的安全程度及相应的区域生态系统特征,结合 2014 年野外考察数据,包括:GPS 信息、景观照片、乡镇基本信息等,选择了 40 个空间信息点,邀请了 5 位相关领域专家对信息点的生态系统特征进行判读、并归类;运用 ArcGIS 中的自然断点分类工具对博州土地生态安全指数进行分类,再综合空间信息点对应的土地生态安全指数值、专家判读分类,并对自然断点分类结果进行适当调整,得出博州土地生态安全评价等级标准(表 3)。

2.3　空间自相关分析

空间自相关性的指标可分为全局指标和局部指标两种[25]:全局指标用于验证整个研究区域某一要素的空间相关关系,而局部指标则用于反映整个大区域中的一个局部小区域单元上的某种地理现象或某一属性与

相邻局部小区域单元上同一现象或属性的相关程度。本研究中运用全局空间自相关指标 Moran′s I 和局部空间自相关指标(LISA)来分析博州土地生态安全的空间特征。Moran′s I 和 LISA 指标的计算公式如下：

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} W_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} W_{ij}} \tag{4}$$

式中，$S^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$，$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$，$x_i$表示第 i 地区的统计值，n 为样本数，W_{ij}为二进制的进阶空间权值矩阵，表示空间队形的相互邻接关系。$i=1,2,\cdots,n$；$j=1,2,\cdots,m$；当区域 i 和区域 j 相邻时，$W_{ij}=1$；当区域 i 和区域 j 不相邻时，$W_{ij}=0$。Moran′s I 值介于−1 和 1 之间，大于 0 为正相关，小于 0 为负相关，绝对值越大，表示空间分布的关联性越大，即空间上有强聚集性或强相异性。反之，绝对值越小，表示空间分布关联性小，当值趋近 0 时，即代表此时空间分布呈随机性。

表 3 博州土地生态安全评价等级标准

Table 3 Grade standard of land ecological security assessment in Bortala

安全等级 Grade of security	分值 Value	土地生态系统特征 Characteristic of land ecological system
Ⅰ	[0.75,1]	区域土地生态安全处于安全水平，生态系统结构十分合理，生态功能完善，适宜区域生态系统可持续发展
Ⅱ	[0.65,0.75)	区域土地生态安全处于较安全水平，生态系统结构较合理，无生态异常现象，生态压力较小，适合区域生态系统发展
Ⅲ	[0.55,0.65)	区域土地生态安全处于临界安全水平，生态系统结构完整，但有生态异常现象，生态压力大，能够满足区域生态系统一般需求
Ⅳ	[0.40,0.55)	区域土地生态安全处于较不安全水平，生态系统结构出现缺陷，生态异常现象多，生态功能退化，勉强支撑区域生态系统的需求
Ⅴ	[0,0.40)	区域土地生态安全处于不安全水平，生态系统结构极不完整，生态功能极弱，难以满足生态系统发展需求

LISA 是将 Moran′s I 分解到各个空间单元，即 Local Moran′s I。对于某一个空间单元 i，LISA 计算公式为：

$$\text{Moran's } I_j = \left(\frac{x_i - \bar{x}}{m}\right)\sum_{j=1}^{n} W_{ij}(x_i - \bar{x}) \tag{5}$$

式中，$m = (\sum_{j=1,j\neq i}^{n} x_j^2)/(n-1) - \bar{x}^2$，正的 I_i值表示该区周围相似值(高值或低值)的空间集群，负的 I_i值则表示非相似值之间的空间集群。再根据下式计算出 LISA 的检验统计量，对局域空间关联进行显著性检验：

$$Z(\text{Moran's } I_i) = \frac{\text{Moran's } I_i - E(\text{Moran's } I_i)}{\sqrt{\text{Var}(\text{Moran's } I_i)}} \tag{6}$$

3 结果与分析

3.1 博州土地生态安全结构特征分析

基于 P-S-R 评价指标体系，利用公式(3)计算得出 2011 年和 2014 年博州地区各乡镇的准则层和目标层的土地生态安全状况(表 4)。为清晰描述博州 LES 的时空变化，运用软件 ArcGIS 根据 LES 等级标准绘制出博州各乡镇 LES 空间状况(图 2)。

就博州各乡镇的 LES 水平而言，2011 年和 2014 年博州大部分乡镇的 LES 处于Ⅲ级，仅小营盘镇、安格里乡和查干屯格乡等达到Ⅱ级，而托托乡则处于Ⅳ级。博州各乡镇的压力子系统多处于Ⅱ级，而作为当地市、县的行政中心，如：城区街道、精河镇和博格达尔镇的压力子系统仅处于Ⅳ级、Ⅴ级，表明行政中心面临着环境、资源和社会的巨大压力，生态功能退化、生态系统结构不完整，而非行政中心的乡镇，其环境、资源和社会压力

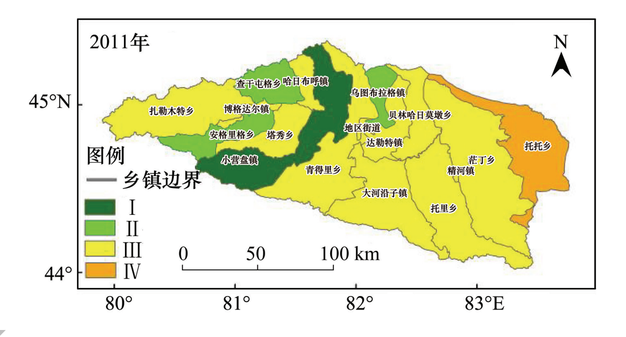
相对较小,生态系统结构较为完善;博州各乡镇的状态子系统则表现为:小营盘镇处于Ⅰ级,温泉县各乡镇处于Ⅱ级,精河县和博乐市的多数乡镇均处于Ⅲ级,其主要原因是温泉县和小营盘镇境内,水资源丰富、生物多样性强,具有稳定生态系统结构,而精河县和博乐市境内虽有丰富的水资源,但境内荒漠、戈壁、裸地等面积较大,导致其生态系统结构较为脆弱、敏感,抗干扰能力较弱;博州各乡镇的响应子系统表现为:行政中心压力子系统处于Ⅰ级,而其余乡镇则多处于Ⅲ级和Ⅳ级,表明行政中心对生态系统可持续发展相关的政策和措施,具有高效的执行力,并取得了良好反馈,而非行政中心受其地缘关系影响,对相关政策、措施的执行效率较低,反馈较弱。

表 4　博州各乡镇土地生态安全状况

Table 4　The land ecological security index of township in Bortala

县市 City	乡镇名称 Township	压力 Pressure			状态 State			响应 Response			土地生态安全 Land ecological security		
		2011	2014	信号 Signal	2011	2014	信号 Signal	2011	2014	信号 Signal	2011	2014	信号 Signal
博乐市	小营盘镇	0.72	0.80	↗	0.83	0.78	↘	0.65	0.62	↘	0.76	0.73	↘
	达勒特镇	0.66	0.69	↗	0.60	0.64	↗	0.42	0.44	↗	0.59	0.59	—
	乌图布拉格镇	0.63	0.71	↗	0.66	0.63	↘	0.60	0.60	—	0.66	0.65	↘
	青得里乡	0.71	0.81	↗	0.56	0.49	↘	0.48	0.46	↘	0.62	0.59	↘
	贝林哈日莫墩乡	0.70	0.75	↗	0.63	0.69	↗	0.49	0.51	↗	0.64	0.65	↗
	城区街道	0.46	0.51	↗	0.64	0.66	↗	0.75	0.80	↗	0.62	0.66	↗
精河县	精河镇	0.32	0.39	↗	0.63	0.68	↗	0.81	0.84	↗	0.60	0.64	↗
	大河沿子镇	0.73	0.75	↗	0.54	0.46	↘	0.49	0.49	—	0.62	0.57	↘
	托里乡	0.75	0.81	↗	0.53	0.56	↗	0.56	0.45	↘	0.65	0.61	↘
	茫丁乡	0.68	0.74	↗	0.68	0.64	↘	0.50	0.51	↗	0.65	0.63	↘
	托托乡	0.71	0.75	↗	0.37	0.38	↗	0.38	0.39	↗	0.52	0.51	↘
温泉县	博格达尔镇	0.42	0.44	↗	0.65	0.60	↘	0.73	0.78	↗	0.60	0.61	↗
	哈日布呼镇	0.72	0.73	↗	0.71	0.61	↘	0.53	0.53	—	0.65	0.62	↘
	查干屯格乡	0.70	0.73	↗	0.72	0.64	↘	0.61	0.61	—	0.67	0.66	↘
	安格里格乡	0.73	0.75	↗	0.70	0.62	↘	0.60	0.59	↘	0.67	0.65	↘
	扎勒木特乡	0.71	0.74	↗	0.68	0.61	↘	0.58	0.54	↘	0.65	0.63	↘
	塔秀乡	0.60	0.62	↗	0.68	0.62	↘	0.47	0.49	↗	0.58	0.57	↘

↗表示改善,↘表示恶化,—表示不变



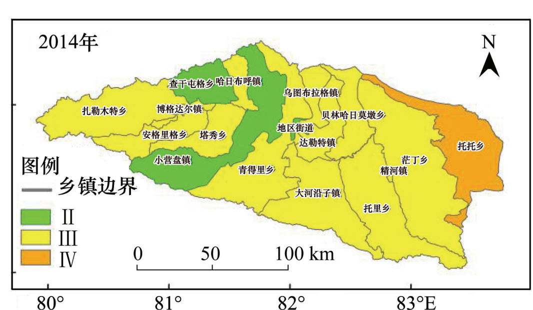


图 2　博州各乡镇土地生态安全指数示意图

Fig.2　Sketch map of land ecological security index of township in Bortala

就博州各乡镇的 LES 变化信号而言,博乐市的城区街道、精河镇、博格达尔镇和贝林哈日莫墩乡有所改善,达勒特镇变化不显著外,但其他各乡镇的 LES 状况均有所恶化。与此同时,2014 年各乡镇的压力子系统均有所改善,表明人类对环境、资源施加的压力有所减小,区域生态系统结构有所改善,比如:各乡镇的人均粮

食产量均有一定的提升,单位耕地的化肥使用量有所减少等;博州各乡镇的状态子系统则表现为:温泉县所有乡镇、小营盘镇、乌图布拉格镇、青得里乡、大河沿子镇和茫丁乡恶化程度较大,其余乡镇则是小幅改善,其主要原因是:区域植被 NDVI 普遍下降、森林覆盖率降低、香农多样性指数减小、区域景观破碎化度增加,状态子系统恶化最严重的哈日布乎镇,其区域 NDVI 水平由 0.42 下降至 0.38,森林覆盖率由 23.00%减少至 19.80%,香农多样性指数由 1.34 下降至 1.28,破碎化程度由 0.21 个/hm^2增加至 0.30 个/hm^2;博州各乡镇的响应子系统表现为:多数乡镇响应子系统变化不显著,但托里乡响应子系统恶化较为严重,由 0.56 下降至 0.45,其主要原因是托里乡的耕地面积比重由 7.49%上升至 14.34%,严重影响到了区域生态结构的稳定,而其第三产业比重由 15.54%下降至 12.03%也是其响应子系统恶化的另一原因。总之,受状态子系统恶化及响应子系统响应不到位的影响,博州多数乡镇的 LES 状况呈恶化现象,而行政中心受益于高效的响应子系统,城区街道、精河镇和博格达尔镇的 LES 有所改善。

3.2 博州土地生态安全时空格局分析

为展布乡镇内部土地生态安全的空间差异,根据公式(3)将标准化后的图层在 ArcGIS 中叠加计算,求得博州 2011 年和 2014 年的 LES(图 3),并通过 ArcGIS 对博州 2011 年和 2014 年的 LES 作转移矩阵分析,见表 5。

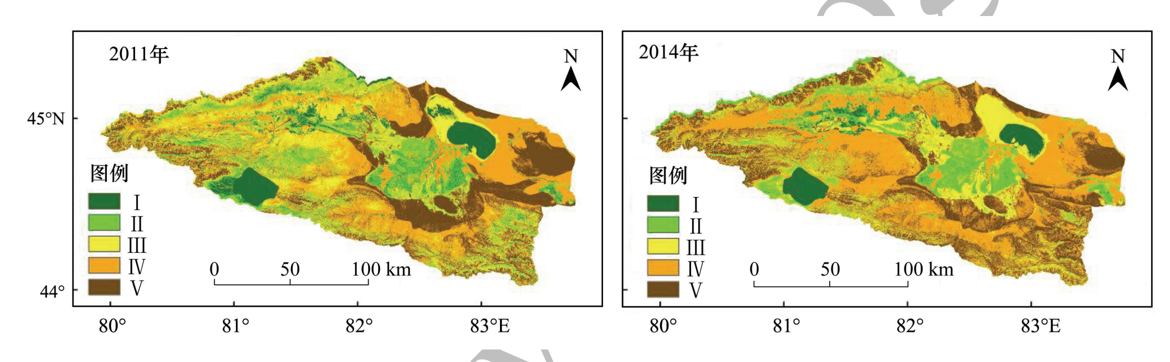


图 3 博州土地生态安全指数空间格局

Fig.3 Spatial pattern of land ecological security index in Bortala

表 5 博州土地生态安全面积转移矩阵 /km^2

Table 5 The areas transfer matrix of land ecological security in Bortala

年份 Year	土地生态安全等级 Land ecological security level	2011 Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	合计 Total
2014	Ⅰ	1125.96	90.60	78.94	33.92	0.11	1329.55
	Ⅱ	754.72	1319.99	400.58	336.64	12.70	2824.63
	Ⅲ	301.79	843.42	1819.73	746.55	147.99	3859.47
	Ⅳ	125.29	736.12	2555.33	6076.39	1356.53	10849.65
	Ⅴ	0.64	42.09	658.24	1102.98	4171.03	5974.98
	合计 Total	2308.34	3032.22	5512.82	8296.47	5688.36	

在空间上,土地生态安全分布格局极不平衡,Ⅰ级和Ⅱ级区域主要为艾比湖、赛里木湖、精河绿洲及温泉北部的阿拉套山脉,Ⅲ级区域主要分布在绿洲-荒漠交错带,Ⅳ级和Ⅴ级区域主要集中在艾比湖东部和东南部的荒漠区域、精河绿洲西部的戈壁区域和南部及温泉县的西部。在 2011 年,除了研究区东部的托托乡、茫丁乡、精河镇和托里乡有大面积Ⅳ级和Ⅴ级区域外,其他乡镇多处于Ⅱ级和Ⅲ级水平,赛里木湖和艾比湖的生态安全水平为最高(Ⅰ级)。至 2014 年,研究区东部地区不安全状况有所改善,但Ⅳ级仍大范围存在,尤其是研究区中西部,大面积Ⅱ级区域转化为Ⅳ级区域,区域生态安全状况明显恶化。研究区中部的乌图布拉格镇、达勒特镇、贝林哈日莫墩乡和大河沿子镇在 2011 年和 2014 年的 LES 变化较小,大多数面积处于Ⅱ级水平。

在时间上,博州 LES 面积呈三减两增的趋势,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级区域面积减小,Ⅳ、Ⅴ级区域面积增加。其中,

2014 年Ⅰ级区域面积较 2011 年缩减 42.40%,缩减面积主要在艾比湖沿岸,并在 2014 年转化为Ⅱ、Ⅲ级;Ⅱ级区域面积缩减 6.85%,缩减区域主要发生在阿拉套山和博尔塔拉河周边;Ⅲ级区域由 2011 年的 5512.82 km^2 缩减至 2014 年的 3859.47 km^2,降幅达 29.99%,缩减区域主要发生在绿洲-荒漠交错带、阿拉套山和天山支脉婆罗科努山,Ⅲ级向Ⅳ级转化的面积最大,高达 2555.33 km^2,其主要原因是 2014 年山区的年均 NDVI 较低,植被长势较差;Ⅴ级向Ⅳ级转化 1356.53 km^2,主要是因为木特塔尔沙漠和旦达盖沙漠周边的土地生态安全背景状况虽有所改善,但受阿拉套山北麓植被长势差的影响,Ⅴ级面积由 2011 年的 5688.36 km^2 增加到 2014 年 5974.98 km^2。自 2011—2014 年,仍有大范围 LES 由高向低转化,说明博州土地生态安全状况恶化,区域生态环境质量有所下降。

3.3　博州土地生态安全空间集聚特征

3.3.1　博州土地生态安全全局空间自相关

地理与生态现象常常表现出空间相关效应,而空间自相关分析方法可解释单位属性或现象的空间依赖关系。因此,通过软件 GeoDA 对博州 LES 进行全局空间自相关分析,得出 2011 年和 2014 博州土地生态安全的 Moran′s I 指数分别为 0.5990 和 0.6763,表明博州土地生态安全在空间上有较强的正相关。为了区分每一区域与其周边区域 LES 的相互关系,运用 GeoDA 根据博州 LES 空间数据,建立基于空间距离关系的权重矩阵,并绘制 Moran 散点图(图 4)。Moran 散点图由 4 个象限组成,分别为“高-高”空间关联区(H-H),表明在这个区域内的点和其空间分布附近的区域 LES 都较高,多为Ⅰ级、Ⅱ级;“低-低”空间关联区(L-L),表明在这个区域内的点和其空间分布附近的区域 LES 都较低,多为Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级;“低-高”空间关联区 (L-H),表明该区域 LES 低于周围区域;而“高-低”空间关联区 (H-L),则表明该区域 LES 高于周围区域。H-H 区和 L-L 区的 LES 的空间单元具有均质性,即可称该区域在空间上具有较强的空间正相关性。而在 L-H 区和 H-L 区的 LES 的空间单元则具有异质性,则表示该区域存在较强的空间负相关。由图 4 可知,2011 年和 2014 年的博州 LES 主要集中在 H-H 区和 L-L 区,在 H-L 区和 L-H 区的相对较少,表明博州 2011 年和 2014 年的土地生态安全均具有较强的空间相关性,空间聚集格局显著。

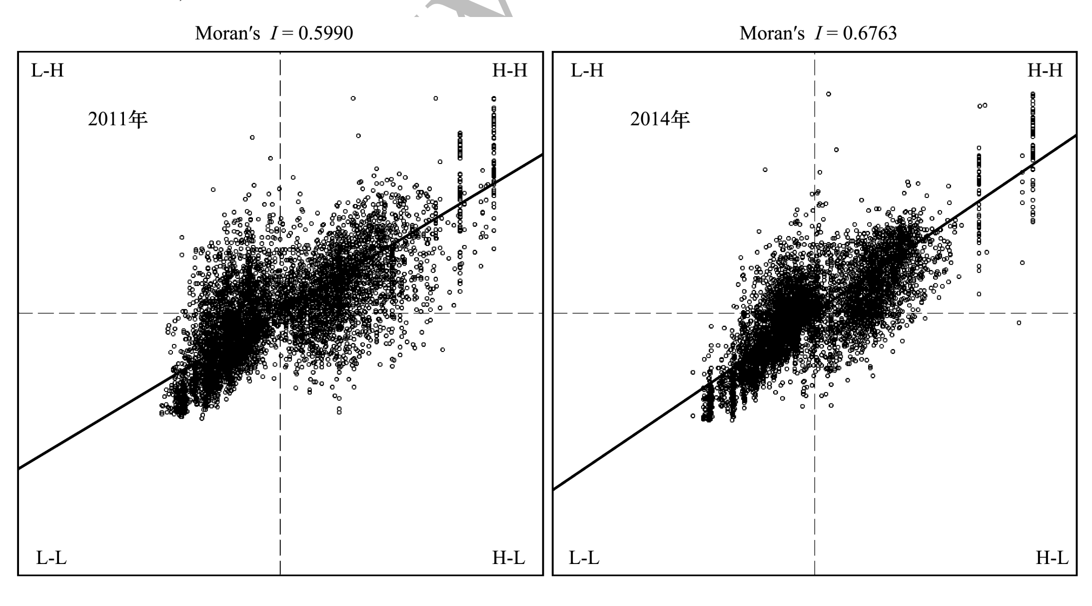


图 4　Moran 散点图

Fig.4　Moran scatter plot

3.3.2　博州土地生态安全局域空间自相关

为了更直观地研究博州土地生态安全空间布局状况,利用 GeoDa 生成 2011 年和 2014 年博州 LES 在 95%置信度下 LISA 空间集聚图(图 5)。

由图 5 知,2011 年和 2014 年的博州 LES 的分布并非完全随机性,而是表现出空间相似值之间的空间聚

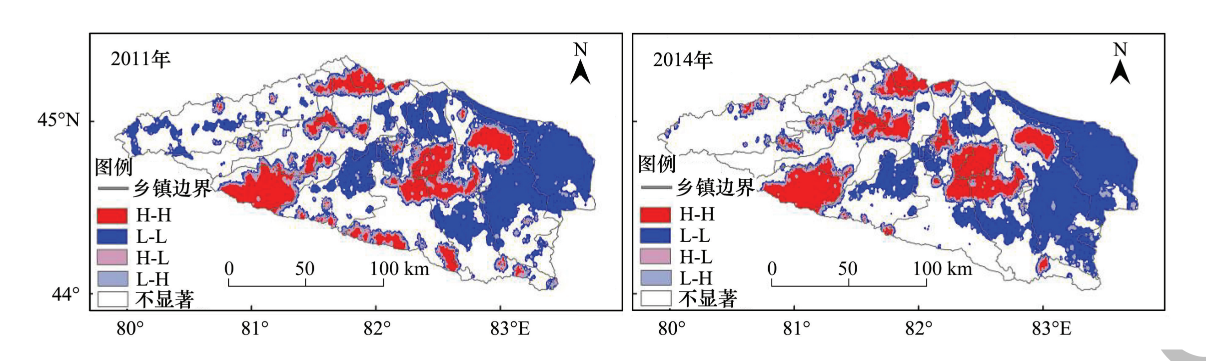


图 5 博州土地生态安全局部空间自相关集聚图

Fig.5 The cluster graph of local spatial autocorrelation in Bortala

集,呈现高、低值集聚的特点;2011 年和 2014 年博州均有大面积的 H-H 区和 L-L 区,而 H-L 区和 L-H 仅有少面积分布在 H-H 区和 L-L 区周围,与此同时,空间局部自相关不显著的区域则主要分布在博州南部和西部,主要在温泉县大部分乡镇、博乐市的青得里乡和精河县的大河沿子镇。其中,2011 年博州 LES 的 H-H 区主要分布在博州东部的托里乡北部、大河沿子镇北部、艾比湖,博州南部的赛里木湖,北部的阿拉套山和南部山区也有小面积 H-H 区;同时有较大面积的 L-L 区分布在博州东部的托托乡、茫丁乡、托里乡南部,博州中部的青得里乡、贝林哈日莫墩乡,而西部则是扎勒木特乡部分区域。2014 年博州 LES 集群格局较 2011 年发生了明显变化,中部 H-H 区向周围扩散,小营盘镇、塔秀乡和哈日布乎镇三乡交界处,H-H 区面积扩张,但艾比湖区域的 H-H 区面积缩减;博州北部的贝林哈日莫墩乡和达勒特镇交界、扎勒木特乡的 L-L 区面积减小,而博州东部的茫丁乡 L-L 区朝南扩张。表明随着"生态文明"建设的实施,博州各乡镇开始重视生态建设,区域 LES 状况得到改善,高值区对周围的低值区有积极的影响。

总之,博州 LES 具有明显地域性分布的特征,L-L 区主要集中在博州东部地区,多为生态系统较单一的荒漠、戈壁区域;H-H 区主要集中在绿洲区域和湖区,而博河河谷两侧山区相对较少。LES 的 H-H 区,往往是土地系统可保障生命体适宜生存的区域,而 LES 的 L-L 区的土地系统则过于单一。

4 讨论

乡镇压力子系统和状态子系统的安全程度明显高于响应子系统,说明博州乡镇响应程度较低,尤其是博乐市和精河县,主要原因在于博州不同区域地理环境和经济发展水平差异较大,经济发展水平高相对于经济落后地区更具环境保护意识、且土地集约利用程度较高,导致乡镇土地生态安全的非均衡程度更高。但高度的土地集约利用,是经济发展水平高的乡镇生态系统压力过大、生态结构脆弱的主要原因。乡镇状态子系统的安全状况仍不容乐观,主要原因是博州地处干旱区,生态结构脆弱、单一,易受 NDVI、景观指数等敏感指标的影响。本文优化选择了 25 个指标构建博州土地生态安全评价指标体系,其中,敏感指标为 NDVI、香农多样性指数、景观破碎度、荒漠化率、土地利用类型等,随着研究区生态结构系统的恶化,NDVI 水平下降、香农多样性指数减小、景观破碎度增大、林草地和耕地退化、水域萎缩,区域生态环境面临严峻考验,但在敏感指标中的荒漠化率仅为 0.06%,相较于大幅恶化的生态环境,荒漠化率的自然响应不显著,其主要原因是受生境恶化影响,茂密植被区转化为稀疏植被区域,而 Landsat 数据无法有效得分离稀疏植被区与裸地。另外,指标体系中仅有水网密度和灌溉比率用于直观描述博州水资源状况,难以揭示下游荒漠地带生态恶化的原因,但综合考虑到博州境内水资源主要源自冰川融水,其次是自然降水,在耕地面积持续增加、农业用水量增加的情况下,博州人口密度小、工业不发达、第一产业比重大,表明该地区中上游农业用水过度是造成下游生态环境恶化的主要原因。同时,受限于不同区域灌溉用水量资料难以获取,难以针对中上游农业用水量多寡对下游生态环境的影响程度做出定量分析。

博州土地生态安全的时空分布呈现出一定的规律性,绿洲区域、湖区及博河河谷两侧山区多为Ⅰ级、Ⅱ

级、Ⅲ级,以精河绿洲、赛里木湖、艾比湖和阿拉套山最为突出;而生态系统较单一的荒漠、戈壁区域多为Ⅳ级、Ⅴ级,如木特塔尔沙漠和旦达盖沙漠[23]。但随着木特塔尔国家沙漠公园的开发及旦达盖沙漠旅游区的筹备,沙漠旅游区已为当地带来发展机遇;而控制沙漠区域向外扩张的速率,积极发展沙漠旅游区,不仅可避免周围区域土壤的退化,亦可为当地带来经济价值,是一种可持续发展战略。与此同时,艾比湖湿地国家自然保护区和甘家湖白梭梭林自然保护区亦是Ⅲ级、Ⅳ级,保护区境内的土壤因受其海拔及干旱区强蒸腾影响,导致艾比湖周边存在大片盐渍地;虽然盐渍地的存在导致区域生态多样性减小,但盐渍地表层的盐壳可有效阻碍水土流失、风蚀及沙丘的移动,间接而有效得保护了周边的生态环境[30]。

2012 年底,我国通过"十八大"开始大力推进"生态文明"建设,博州城镇土地集约化、城市化水平提高,第三产业比重增加、当地经济重心由第一产业逐渐向第三产业转移,科技水平提升、单位土地机械化水平提高,路网密度增加、区域资源交互流通性增强,单位耕地农药量、地膜使用量减少,2014 年博州各乡镇的土地生态安全社会响应均优于 2011 年,说明博州政府很好得践行了"生态文明"的战略决策,提高了区域土地生态安全的响应能力、减轻了区域土地的生态压力。虽然 2014 年博州土地生态安全响应子系统和状态子系统均优于 2011 年,但 2014 年博州各乡镇土地生态安全压力子系统呈恶化现象,其主要原因是博州地处我国西北干旱生态脆弱地区,气候条件较为恶劣,土地生态系统稳定性低,2014 年受区域降水量少、耕地用水量增加、绿洲-荒漠交错区盐渍化现象加重,同时,山区林草地景观破碎化加剧,这些现象是导致博州 2014 年 LES 下降的主要原因,脆弱的自然条件为博州提高自身土地生态安全程度增加了难度[1,8,21]。其次,非行政中心乡镇受限于政策执行力度、资源分配等问题,社会响应提升有限。虽然社会经济的优化发展提高了区域 LES,但受限于干旱区的土地生态结构处于较低水平,博州土地生态安全整体状况仍亟待改善。在社会经济快速发展的同时,应着重于生态文明建设,保护土地生态环境,从而保障区域土地生态安全状况。因此,建议行政中心所在乡镇应通过发展高集约化、多功能生态产业,满足都市人群需求;其他乡镇在结合自身实际情况,坚持生态优先,结合各个乡镇空间功能的差异性以及各区域特色,因地制宜的调整各乡镇的产业结构和生产格局;而小营盘镇、茫丁乡水源涵养区和托托乡的生态保护发展区,要深入挖掘本地区的资源优势,发展生态旅游业和沙漠生态特色农业。

5　结论

P-S-R 框架模型是目前评估区域土地生态安全变化最为广泛的方法之一,然而在评估社会-经济-土地生态背景结合下乡镇尺度土地生态安全研究相对较少。本文尝试在综合考虑各乡镇的社会经济发展情况及区域土地的基本生态状况,从乡镇级土地生态安全评价视角出发,得出如下结论:

(1) 博州大部分乡镇的土地生态安全状况处于临界安全水平,仅小营盘镇、安格里乡和查干屯格乡等达到了较安全水平,而托托乡则处于较不安全水平。2011—2014 年,除博乐市的城区街道、精河镇、博格达尔镇和贝林哈日莫墩乡的土地生态安全状况有所改善,其他各乡镇均有所恶化。

(2) 博州土地生态安全状况恶化区域的主要问题是植被群落长势差、生态环境恶化、人类社会面对脆弱环境的响应措施效果差,而改善区域的主要原因是人们高效的环境保护措施、社会对生态环境施加的压力减少。

(3) 博州土地生态安全状况具有明显地域性分布的特征,低值区多集中于博州东部地区,多为生态系统较单一的荒漠、戈壁区域;高值区多集中绿洲区域和湖区,而博河河谷两侧山区相对较少。

总之,研究结果较客观地反映了博州土地生态安全变化的特征,评价结果基本符合博州乡镇发展的实际,体现了 P-S-R 指标体系在评估乡镇土地生态安全的可行性,突出了所选指标的敏感性和重要性,可为区域生态保护协调推进与乡镇可持续发展提供理论指导。同时,受限于乡镇资料的获取难度,构建的指标体系有待进一步完善。

致谢:感谢美国孟菲斯大学地球科学系 Hsiang-te KUNG 教授,澳大利亚 CSIRO 水土资源研究所陈芸研究员对写作的帮助。

参考文献(References):

[1] Liu X L, Yang Z P, Di F, Chen X G. Evaluation on tourism ecological security in nature heritage sites-case of Kanas nature reserve of Xinjiang, China. Chinese Geographical Science, 2009, 19(3): 265-273.

[2] 刘彦随, 刘玉, 陈玉福. 中国地域多功能性评价及其决策机制. 地理学报, 2011, 66(10): 1379-1389.

[3] 张振明, 刘俊国. 生态系统服务价值研究进展. 环境科学学报, 2011, 31(9): 1835-1842.

[4] IIASA. Modeling land/cover change in Europe and Northern Asia. 1999 Research Plan, 1999.

[5] Huang L, Yan L J, Wu J G. Assessing urban sustainability of Chinese megacities: 35 years after the economic reform and open-door policy. Landscape and Urban Planning, 2016, 145: 57-70.

[6] 谢高地, 封志明, 沈镭, 黄河清, 李丽娟, 成升魁. 自然资源与环境安全研究进展. 自然资源学报, 2010, 25(9): 1424-1431.

[7] Ezeonu I C, Ezeonu F C. The environment and global security. Environmentalist, 2000, 20(1): 41-48.

[8] Huang J F, Wang R H, Zhang H Z. Analysis of patterns and ecological security trend of modern oasis landscapes in Xinjiang, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 134(1/3): 411-419.

[9] Turner B L. Local faces, global flows: the role of land use and land cover in global environmental change. Land Degradation & Rehabilitation, 1994, 5(2): 71-78.

[10] Hughey K F, Cullen R, Kerr G N, Cook A J. Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment. Journal of Environmental Management, 2004, 70(1): 85-93.

[11] Christiansen F. Food security, urbanization and social stability in China. Journal of Agrarian Change, 2009, 9(4): 548-575.

[12] Sun L Y, Liu Z J, Zheng M G, Cai Q G, Fang H Y. Temporal variations of ecological security with soil and water loss stress in black soil region of northeast China: a case study on Baiquan County. SpringerPlus, 2013, 2(S1): S6.

[13] Liu D, Chang Q. Ecological security research progress in China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 111-121.

[14] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Zhuang Q L, Li H P, Wan R R, Su W Z, Zhang J. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020. Science of the Total Environment, 2016, 554-555: 7-16.

[15] Zhang J S, Gao J Q. Lake ecological security assessment based on SSWSSC framework from 2005 to 2013 in an interior lake basin, China. Environmental Earth Sciences, 2016, 75: 888.

[16] 余健, 房莉, 仓定帮, 朱琳, 卞正富. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用. 农业工程学报, 2012, 28(5): 260-266.

[17] 赵宏波, 马延吉. 基于变权-物元分析模型的老工业基地区域生态安全动态预警研究——以吉林省为例. 生态学报, 2014, 34(16): 4720-4733.

[18] Li X B, Tian M R, Wang H, Wang H, Yu J J. Development of an ecological security evaluation method based on the ecological footprint and application to a typical steppe region in China. Ecological Indicators, 2014, 39: 153-159.

[19] Zhou K H, Liu Y L, Tan R H, Song Y. Urban dynamics, landscape ecological security, and policy implications: A case study from the Wuhan area of central China. Cities, 2014, 41: 141-153.

[20] 何玲, 贾启建, 李超, 许皞. 基于生态系统服务价值与粮食安全的生态安全底线核算. 应用生态学报, 2016, 27(1): 215-224.

[21] 王宏卫, 安秀峰, 塔西甫拉提·特依拜, 索菲娅, 谢霞, 刘勤. 基于乡镇尺度的克里雅河绿洲生态承载力分析——以于田县 13 个乡镇生态承载力为例. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10): 48-55.

[22] 蒙吉军, 赵春红, 刘明达. 基于土地利用变化的区域生态安全评价——以鄂尔多斯市为例. 自然资源学报, 2011, 26(4): 578-590.

[23] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 曹鑫, 丁建丽, 张严俊, 姜红涛. 干旱区内陆艾比湖流域景观格局时空变化及生态安全评价. 水土保持通报, 2015, 35(1): 249-255.

[24] 于潇, 吴克宁, 郧文聚, 魏洪斌, 刘玲, 宋英赫, 高星. 三江平原现代农业区景观生态安全时空分异分析. 农业工程学报, 2016, 32(8): 253-259.

[25] 王耕, 苏柏灵, 王嘉丽, 朱正如. 基于 GIS 的沿海地区生态安全时空测度与演变——以大连市瓦房店为例. 生态学报, 2015, 35(3): 670-677.

[26] 裴欢, 魏勇, 王晓妍, 覃志豪, 侯春良. 耕地景观生态安全评价方法及其应用. 农业工程学报, 2014, 30(9): 212-219.

[27] 朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 曹光兰, 王凡凡. 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究. 生态学报, 2014, 34(6): 1379-1390.

[28] 吕建树, 吴泉源, 张祖陆, 刘洋. 基于 RS 和 GIS 的济宁市土地利用变化及生态安全研究. 地理科学, 2012, 32(8): 928-935.

[29] 赵海霞, 崔建鑫, 董雅文, 高俊峰, 王淑芬. 基于生态——经济协调发展的乡镇空间功能分区. 长江流域资源与环境, 2016, 25(3): 375-386.

[30] 赵顺阳, 王文科, 乔冈, 王文明. 艾比湖流域生态环境质量评价. 干旱区资源与环境, 2007, 21(5): 63-67.

[31] 陈趁新, 胡昌苗, 霍连志, 唐娉. Landsat TM 数据不同辐射校正方法对土地覆盖遥感分类的影响. 遥感学报, 2014, 18(2): 320-334.

[32] 刘勇洪, 牛铮, 王长耀. 基于 MODIS 数据的决策树分类方法研究与应用. 遥感学报, 2005, 9(4): 405-412.

[33] Wang H, Long H L, Li X B, Yu F. Evaluation of changes in ecological security in China's Qinghai Lake Basin from 2000 to 2013 and the relationship to land use and climate change. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(2): 341-354.

[34] 甘彩红, 李阳兵, 邵景安, 王永艳. 三峡库区腹地县域耕地压力研究——以奉节县 27 个乡镇为例. 资源科学, 2014, 36(7): 1365-1373.

[35] 任亮平, 刘海, 严圣华. 基于 GIS 的乡镇土地生态适宜性评价研究——以马口镇为例. 国土与自然资源研究, 2013, (4): 60-62.

[36] 凡宸, 夏北成, 秦建桥. 基于 RS 和 GIS 的县域生态环境质量综合评价模型——以惠东县为例. 生态学杂志, 2013, 32(3): 719-725.

[37] 解雪峰, 吴涛, 肖翠, 蒋国俊, 边华菁, 马勇, 陈建华. 基于 PSR 模型的东阳江流域生态安全评价. 资源科学, 2014, 36(8): 1702-1711.

[38] 王耕, 王嘉丽, 龚丽妍, 苏柏灵, 刘秋波. 基于 GIS-Markov 区域生态安全时空演变研究——大连市甘井子区为例. 地理科学, 2013, 33(8): 957-964.

[39] Han B L, Liu H X, Wang R S. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods. Ecological Modelling, 2015, 318: 217-225.

[40] 谢余初, 巩杰, 张玲玲. 基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化. 地理科学, 2015, 35(6): 790-797.

[41] 潘竟虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建. 生态学杂志, 2016, 35(3): 791-799.

[42] 张玉泽, 任建兰, 刘凯, 程钰. 山东省生态安全预警测度及时空格局. 经济地理, 2015, 35(11): 166-171.

